

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 597 668** <sup>(13)</sup> **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(51) МПК  
[G01T 1/36 \(2006.01\)](#)

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

Статус: прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса: 27.02.2018)

(21)(22) Заявка: [2015118402/28](#), 15.05.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 15.05.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 15.05.2015

(45) Опубликовано: [20.09.2016](#) Бюл. № [26](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2392642 C1, 20.06.2010; RU 2085967 C1, 27.07.1997; RU 2067306 C1, 27.09.1996; WO 2014015639 A1, 30.01.2014. WO 2014126571 A1, 21.08.2014.

Адрес для переписки:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,  
УрФУ, Центр интеллектуальной  
собственности, Маркс Т.В.

(72) Автор(ы):

**Игнатьев Олег Валентинович (RU),  
Белоусов Максим Павлович (RU),  
Морозов Сергей Геннадьевич (RU),  
Громыко Максим Викторович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

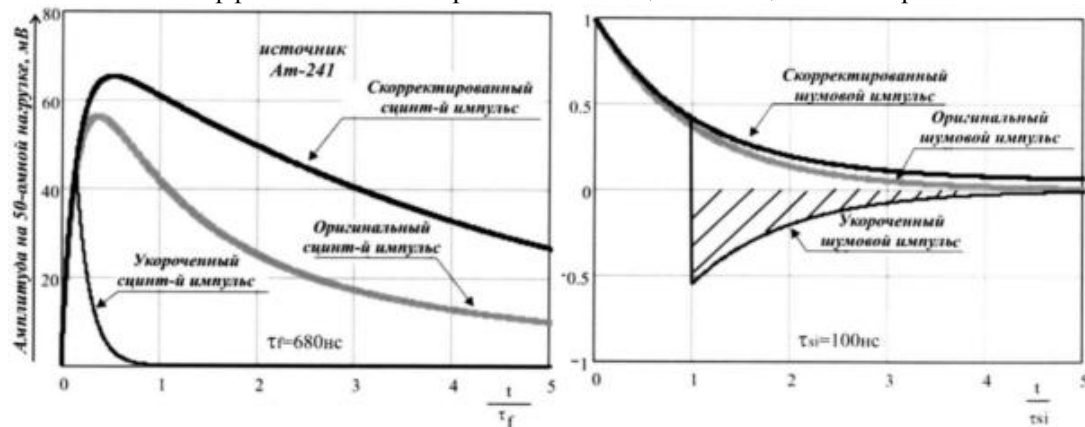
**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина" (RU),  
Общество с ограниченной  
ответственностью "Научно-  
производственная компания "АТОМ  
Электроникс" (RU)**

**(54) СПОСОБ ПОДАВЛЕНИЯ ЛАВИННОГО ШУМА В СПЕКТРОМЕТРАХ С МЕДЛЕННЫМИ СЦИНТИЛЛЯТОРАМИ И КРЕМНИЕВЫМИ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯМИ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к сцинтилляционным спектрометрам ионизирующих излучений. Сущность изобретения заключается в том, что сцинтилляционные сигналы и лавинные шумовые импульсы с выхода кремниевого фотоумножителя, прежде чем они попадут на интегратор сцинтилляционных импульсов, разветвляются в основной и вспомогательный каналы и при этом во вспомогательном канале, пользуясь значительным, не менее чем 10-кратным отличием в длительностях сцинтилляционных и лавинных шумовых импульсов, производят укорачивание сцинтилляционных импульсов до длительности, соизмеримой с длительностью исходных лавинных шумовых импульсов, а затем, с помощью нелинейных или время-вариантных преобразований, выделяют модифицированные шумовые импульсы, масштабируют их таким образом, чтобы их площади соответствовали площадям исходных лавинных шумовых импульсов, и подают их на суммирование со сцинтилляционными сигналами и лавинными шумовыми импульсами первого канала с полярностью, противоположной полярности лавинных шумовых импульсов в основном канале, после чего полученный аддитивный поток сцинтилляционных сигналов и лавинных шумовых импульсов из основного канала и модифицированных шумовых импульсов вспомогательного каналов подают на вход интегратора

сцинтилляционных сигналов, где происходит окончательная попарная компенсация лавинных шумовых импульсов, прошедших по обоим каналам. Технический результат - повышение эффективности сбора света со сцинтилляционных кристаллов. 3 ил.



Фиг. 3

Настоящее изобретение относится к области ядерного приборостроения, точнее к устройствам сцинтилляционных спектрометров ионизирующих излучений, в которых для достижения предельного энергетического разрешения необходима длительная обработка каждого из сигналов детектора. В первую очередь это те спектрометры, где сцинтилляторы характеризуются относительно большими временами высвечивания, например с кристаллами CsI:Tl, BaF<sub>2</sub>, SrI<sub>2</sub>:Eu и др.

Типичный сцинтилляционный спектрометр энергий содержит (фиг. 1) сцинтиллятор и оптически сочлененный с ним фотоэлектронный умножитель, образующих детектор 1; зарядочувствительный предусилитель 2 или резистор нагрузки 3 и процессор детекторных импульсов 4. Сцинтиллятор служит для преобразования энергии поглощенных в нем гамма-квантов или заряженных частиц в световые вспышки пропорциональной интенсивности. PMT преобразует световые вспышки в пропорциональные импульсы тока на своем аноде; ChA, являющийся по сути интегратором, преобразует импульсы тока на аноде фотоумножителя в экспоненциальные импульсы напряжения с постоянной времени спада  $\tau_{pA} \geq 50 \mu s$  и временем нарастания  $T_r$ , определяемым длительностью импульса тока на аноде фотоумножителя. Процессор детекторных импульсов выполняет функции усиления; формирования детекторных импульсов с амплитудой, пропорциональной площади импульса тока на аноде фотоумножителя (а значит, и энергии кванта или частицы); стабилизации базовой линии спектрометра, инспекции и режекции наложенных во времени сигналов, преобразования амплитуд сформированных импульсов в цифровой код и передачу этих кодов в устройство накопления, обработки и визуализации спектров (обычно это какой-либо персональный компьютер, но может быть и специализированный микропроцессор).

Современные электронные фотоумножители характеризуются высоким коэффициентом усиления  $G_{phe}$  числа образованных в материале фотокатода светом фотоэлектронов ( $G_{phe} = 10^5 \div 5 \times 10^6$ ). Поэтому принципиальной необходимости применения зарядочувствительного предусилителя, который с детекторами без внутреннего усиления обеспечивает минимизацию вносимых электронным трактом шумов, здесь нет. ChA применяют в сцинтилляционных спектрометрах с электронным каналом (PDP), выполненном на универсальных спектрометрических модулях [CANBERRA. Instrument Catalog (Edition 9). 338 p.] для обеспечения требуемой ими формы импульсов ( $\tau_{pA} \geq 50 \mu s$ ). В моноприборах ограничиваются простой резистивной нагрузкой на аноде PMT, обычно это 50  $\Omega$  для согласования с кабелем [Belousov M.P. и др. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01. Аналитика и контроль V. 15 (2011) №4. p. 429-438, Belousov M.P. et al. Scintillation spectrometer SBL-1 for the x-ray densitometer of radioactive technological solutions. Analytics and Control V. 17 (2013) №1, p. 21-26].

В любом случае, есть в составе спектрометра зарядочувствительный предусилитель либо нет, на выходе формирователя детекторных импульсов стремятся получать импульсы с временем достижения пикового значения  $T_{peak}$ , большим, чем полная длительность сцинтилляционной вспышки  $T_{LF}$ . Этим обеспечивается максимальное использование фотонов сцинтилляции в формировании импульса, чья амплитуда является мерой энергии поглощенного в детекторе гамма-кванта или

заряженной частицы. Если  $T_{\text{peak}} < T_{\text{LF}}$ , то фотоны света, возникшие после  $T_{\text{peak}}$ , и рожденные ими фотоэлектроны никак не участвуют в формировании максимального значения сигнала  $S_{\text{peak}}$  при  $t = T_{\text{peak}}$  - возникает так называемый баллистический дефицит. При данной энергии  $\gamma$ -кванта  $E_\gamma$  амплитуда импульса оказывается меньше, чем была бы при выполнении условия  $T_{\text{peak}} \geq T_{\text{LF}}$ . Сцинтилляционные вспышки сцинтилляторов в первом приближении описываются одной или суммой нескольких экспоненциальных компонент высвечивания. В случае однокомпонентной сцинтилляции  $T_{\text{LF}} \geq 4,6\tau_{\text{LF}}$  (99% полной длительности) или  $T_{\text{LF}} \geq 6,9\tau_{\text{LF}}$  (99,9%). Здесь  $\tau_{\text{LF}}$  - постоянная времени высвечивания сцинтиллятора. Сигналы на выходе формирователя имеют, как правило, квазигауссову форму, что достигается 2-3-кратным интегрированием экспоненциальных импульсов на активных фильтрах нижних частот.

В последнее десятилетие получают все большее применение кремниевые фотоумножители (SiPM) [Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014 г., 323 с.]. Они представляют собой кремниевые сэндвичи - слои, образующие рп-переходы, на которые подано обратное смещение. Размеры чувствительной к свету поверхности от  $1 \times 1$  до  $6 \times 6$  mm. Толщина сэндвича  $\approx 5 \mu\text{m}$ . Каждый такой сэндвич содержит в себе несколько тысяч микропикселей - миниатюрных счетчиков Гейгера-Мюллера с гасящими разряд резисторами. Размер одного микропикселя от  $10 \times 10$  до  $50 \times 50 \mu\text{m}$ . Фотон света, с вероятностью  $40 \div 70\%$  (отношение чувствительной и общей площадей фотосенсора - FF) попавший на микропиксель с вероятностью  $25 \div 75\%$  (квантовая эффективность - QE), вызывает появление электрон-дырочной пары. Далее, с вероятностью  $70 \div 90\%$  ( $P_G$ ), двигаясь в электрическом поле с высокой напряженностью, фотоэлектрон рождает лавину электронов с числом носителей  $10^5 \div 10^6$  (это вполне соответствует усилению вакуумных фотоумножителей). Величина, равная  $FF \times QE \times P_G$ , называется фотодетекторной эффективностью кремниевого фотоумножителя (PDE). Процесс образования лавины занимает около 1 ns. Возникающий лавинный ток протекает через гасящий резистор, напряжение падает и лавина прекращается. На нагрузке образуется сигнал стандартной амплитуды. Линейная зависимость между засветкой SiPM сцинтилляционной вспышкой и величиной выходного тока достигается за счет большого числа микропикселей, подключенных к общей нагрузке, но при условии, что число фотонов света во вспышке существенно ниже, чем число микропикселей.

Целый ряд преимуществ кремниевых фотоумножителей перед вакуумными фотоумножителями (PMT) делают их очень перспективными для создания сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений. Это нечувствительность к магнитному полю; малые габариты и масса; низкое значение рабочего напряжения ( $25 \div 75$  V против  $1000 \div 2000$  V, необходимых для PMT); более широкий, чем для PMT, спектральный диапазон чувствительности к свету (от фиолетового до оранжевого). Есть, однако, у SiPM свойства, которые не позволяют заместить ими во всех случаях PMT.

Главное - это наличие темнового тока, который создает электронный шум, сильно зависящий от температуры. Другие полупроводниковые фотосенсоры, применяемые со сцинтилляторами (PIN-фотодиоды, лавинные фотодиоды), также обладают током утечки (темновым током), но характер возникающего в них шума коренным образом отличается от того, какой возникает в SiPM. Дело в том, что электроны, составляющие обычный ток утечки в полупроводнике, попадая в область высокой напряженности поля, вызывают с вероятностью  $P_G$  образование лавин точно так же, как это происходит от электронов, образованных в результате фотоэффекта. В итоге шум на выходе SiPM представляет собой пуассоновский поток однополярных импульсов экспоненциальной формы с дискретным рядом амплитуд, соответствующих 1-му, 2-му, 3-му первичным электронам. Постоянная времени спада  $\tau_R$  обусловлена процессом восстановления напряжения на микропикселе после окончания лавины - восстановление заряда на паразитной емкости через гасящий резистор. В зависимости от размеров SiPM, размеров микропикселей и технологии изготовления  $\tau_R = 10 \div 100$  ns. Характеристикой "лавинного" шума, образующегося в SiPM, является приводимая производителями темновая скорость счета (Dark Count Rate - DCR). Величина скорости счета "лавинных" шумовых импульсов при комнатной температуре может достигать значений  $DCR = 1,20 \div 3,4$  MHz ("SensL" C-series  $6 \times 6$  mm,  $35 \mu\text{m}$ ).

Можно оценить влияние "лавинного" шума на энергетическое разрешение спектрометра со сцинтиллятором CsI:TI стандартного размера  $\varnothing 38 \times 38$  mm, например.

Пусть регистрируется энергия  $\gamma$ -квантов от источника  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma=662 \text{ KeV}$ ). Среднее число образованных фотонов света (ph) составит

$$\langle N_{ph} \rangle = E_\gamma \times LY = 662 \text{ KeV} \times 64 \text{ ph/KeV} = 42368 \text{ ph}, \quad (1)$$

где LY - световыход сцинтиллятора CsI:Tl, ph/KeV.

Среднее число рожденных в SiPM лавинообразующих электронов  $\langle N_{sc_e} \rangle$  дается формулой (2):

$$\langle N_{sc_e} \rangle = \langle N_{ph} \rangle \times PDE = 42368 \times 0,15 = 6355 \text{ e}^-, \quad (2)$$

где PDE - эффективность преобразования в SiPM фотонов света лавинные электроны при  $\lambda_{sc}=550 \text{ nm}$ .

Сцинтиллятор CsI:Tl характеризуется достаточно большим временем высвечивания - около  $15 \mu\text{s}$  и за это время возникнет в среднем 6355 рожденных светом электронов.

Для сбора света со сцинтиллятора упомянутых размеров потребуется 49 экз. SiPM  $6 \times 6 \text{ mm}$ . Если взять значение DCR=1,5 MHz для одного экземпляра, то средний интервал между возникновениями "лавиных" шумовых импульсов составит 830 ns.

Для матрицы из параллельно включенных 49 экз. этот интервал составит  $\approx 17 \text{ ns}$ .

Таким образом, за время высвечивания сцинтиллятора ( $15 \mu\text{s}$ ) образуется

$15 \times 10^3 \text{ ns} / 17 \text{ ns} = 880$  лавинных шумовых электронов  $\langle N_{n_e} \rangle$ . За счет этих 880

лавиных шумовых электронов центр тяжести зарегистрированного пика  $E_\gamma=662 \text{ KeV}$  сместится вправо по шкале энергий и новое положение будет соответствовать энергии 753 KeV. Приращение в 92 KeV получают и все остальные пики аппаратного гамма-спектра. Хуже то, что положение пиков будет сильно зависеть от температуры из-за экспоненциальной зависимости от нее DCR. Система стабилизации энергетической шкалы спектрометра становится обязательной. Еще одно следствие действия лавинного шума - ухудшение относительного энергетического разрешения ( $\eta$ ). Статистическая составляющая относительного энергетического разрешения обратно пропорциональна корню квадратному из среднего числа носителей заряда и дается выражением:

$$\eta_{st} = 2,35 \times [(\langle N_{sc_e} \rangle)^{0,5} / \langle N_{sc_e} \rangle] \times 100\% = 2,94\% \quad (3)$$

Флуктуации числа лавинных шумовых электронов, как упоминалось выше, подчиняется распределению Пуассона, поэтому шумовая составит

$$\eta_n = 2,35 \times [(\langle N_{n_e} \rangle)^{0,5} / \langle N_{sc_e} \rangle] \times 100\% = 1,1\% \quad (4)$$

Величина шумовой составляющей энергетического разрешения составляет почти 40% от статистической. При меньших энергиях вклад еще выше. Никакими традиционными мерами, кроме охлаждения SiPM и применения сцинтилляторов с гораздо более коротким временем высвечивания (что не всегда приемлемо), избавиться от влияния лавинного шума невозможно.

Задачей изобретения является создание способа подавления лавинного шума в спектрометрах с медленными сцинтилляторами и кремниевыми фотоумножителями, основанного на том, что лавинный шум состоит из отдельных однополярных импульсов постоянной формы и конечной средней частоты следования.

Указанная задача решается тем, что сцинтилляционные сигналы и лавинные шумовые импульсы с выхода кремниевого фотоумножителя, прежде чем они попадут на интегратор сцинтилляционных импульсов, разветвляются в основной и вспомогательный каналы и при этом во вспомогательном канале, пользуясь значительным, не менее чем 10-кратным отличием в длительностях сцинтилляционных и лавинных шумовых импульсов, производят укорачивание сцинтилляционных импульсов до длительности, соизмеримой с длительностью исходных лавинных шумовых импульсов, а затем, с помощью нелинейных или время-вариантных преобразований, выделяют модифицированные шумовые импульсы, масштабируют их таким образом, чтобы их площади соответствовали площадям исходных лавинных шумовых импульсов и подают их на суммирование со сцинтилляционными сигналами и лавинными шумовыми импульсами первого канала с полярностью, противоположной полярности лавинных шумовых импульсов в основном канале, после чего полученный аддитивный поток сцинтилляционных сигналов и лавинных шумовых импульсов из основного канала и модифицированных шумовых импульсов вспомогательного каналов подают на вход интегратора сцинтилляционных сигналов, где происходит окончательная попарная компенсация лавинных шумовых импульсов, прошедших по обоим каналам.

Реализация способа показана на фиг. 2, где приведена структурная схема компенсатора лавинных шумовых импульсов. Сигнал с 50-омной нагрузки 3

кремниевого фотоумножителя разветвляется на вход аналогового сумматора 8 и на вход формирователя компенсирующих импульсов, содержащий изодромный интегратор 5, устройство дифференцирования импульсов 6 и ограничитель с нулевым порогом 7. В формирователе компенсирующих импульсов происходит устранение быстрой составляющей сцинтилляционного импульса, описываемого выражением [G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons. 3-rd Edition, 1999, 801 P.]:

$$LF(t) = 0,64 \times \exp(-t/\tau_f) + 0,36 \times \exp(-t/\tau_s), \quad (5)$$

где  $\tau_f$  - быстрая компонента высвечивания ( $\tau_f=680$  ns);

$\tau_s$  - медленная компонента высвечивания ( $\tau_s=3,34$   $\mu$ s).

Изодромный интегратор 5 увеличивает постоянную высвечивания  $\tau_f=680$  ns до величины  $\tau_s=3,34$   $\mu$ s, и в итоге сигнал, соответствующий сцинтилляционной вспышке, состоящей из суммы двух экспоненциальных компонент, превращается в однокомпонентный - экспонента с постоянной времени высвечивания  $\tau_s=3,34$   $\mu$ s. Преобразование 2-компонентного сигнала в 1-компонентный необходимо принципиально, чтобы была возможность укоротить его до минимальной длительности. В данном случае такое укорачивание выполняется устройством линии задержки 6. Дифференцирование на линии задержки (DL) происходит путем суммирования на выходе A2 прямого и задержанного на время  $TDL=\tau_{si}=100$  ns импульсов (как сцинтилляционного, так и шумового). Здесь  $\tau_{si}$  - постоянная времени восстановления SiPM. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу компенсатора, приведены на фиг. 3.

На компенсацию поступает отрицательная полуволна продифференцированного лавинного шумового импульса (показана штриховкой), которая выделяется с помощью ограничителя с нулевым порогом ограничения 7. Сцинтилляционный импульс необходимо укорачивать до минимума, чтобы компенсация происходила на возможно большей длительности сцинтилляционного импульса. Нижний предел укорачивания ограничивается падением амплитуды укороченных сцинтилляционных сигналов до амплитуд продифференцированных лавинных шумовых импульсов. На выходе сумматора 8 (фиг. 2) получается аддитивная смесь биполярных шумовых импульсов с равными площадями положительной и отрицательной частей и исходных сцинтилляционных импульсов. На интеграторе, размещенном в процессоре детекторных импульсов 4 (фиг. 1), формируется спектрометрический импульс с пиковым временем, достаточным для сбора всех фотонов световой вспышки, а биполярные шумовые импульсы дают нулевой вклад. Лишь малая их часть, а именно те, которые возникли в течение времени действия укороченного сцинтилляционного импульса, остаются некомпенсированными.

Технический результат применения заявляемого способа подавления лавинного шума в спектрометрах с медленными сцинтилляторами и кремниевыми фотоумножителями состоит в том, что появляется возможность создавать матрицы из параллельно включенных SiPM для эффективного сбора света со сцинтилляционных кристаллов любых практически значимых размеров без ухудшения энергетического разрешения из-за действия лавинного шума.

Перечень фигур графических изображений

Фиг. 1 Типовая структура сцинтилляционного спектрометра с фотоумножителем,

Фиг. 2. Вариант компенсатора лавинного шума с активным изодромным интегратором (для устранения быстрой компоненты сцинтилляционной вспышки CsI:Tl с  $\tau_f=680$  ns).

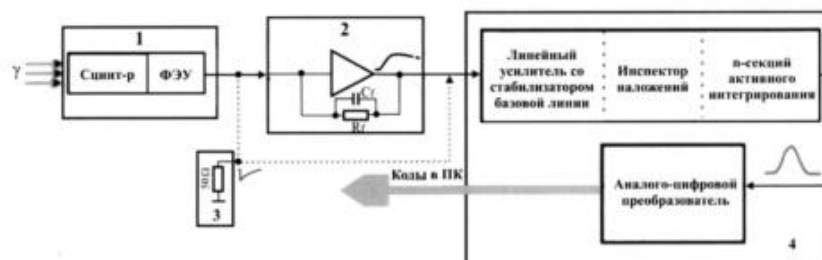
Фиг. 3. Временные диаграммы для сцинтилляционного и лавинного шумового импульсов. Сцинтилляционный импульс соответствует поглощенному гамма-кванту с энергией  $E_\gamma=59,5$  KeV. Временные оси в целях наглядности даны в единицах постоянной времени высвечивания быстрой компоненты ( $\tau_f=680$  ns) для сцинтилляционного сигнала и единицах постоянной времени восстановления SiPM ( $\tau_{si}=100$  ns).

#### Формула изобретения

Способ подавления лавинного шума в спектрометрах с медленными сцинтилляторами и кремниевыми фотоумножителями с низкоомной нагрузкой, включающий интегрирование электрических сигналов, вызванных сцинтилляционными вспышками, и возникающих в кремниевом фотоумножителе лавинных шумовых импульсов, гораздо более коротких, чем сцинтилляционные

сигналы, отличающийся тем, что сцинтилляционные сигналы и лавинные шумовые импульсы с выхода кремниевого фотоумножителя, прежде чем они попадут на интегратор сцинтилляционных импульсов, разветвляются в основной и вспомогательный каналы и при этом во вспомогательном канале, пользуясь значительным, не менее чем 10-кратным отличием в длительностях сцинтилляционных и лавинных шумовых импульсов, производят укорачивание сцинтилляционных импульсов до длительности, соизмеримой с длительностью исходных лавинных шумовых импульсов, а затем, с помощью нелинейных или время-вариантных преобразований, выделяют модифицированные шумовые импульсы, масштабируют их таким образом, чтобы их площади соответствовали площадям исходных лавинных шумовых импульсов, и подают их на суммирование со сцинтилляционными сигналами и лавинными шумовыми импульсами первого канала с полярностью, противоположной полярности лавинных шумовых импульсов в основном канале, после чего полученный аддитивный поток сцинтилляционных сигналов и лавинных шумовых импульсов из основного канала и модифицированных шумовых импульсов вспомогательного каналов подают на вход интегратора сцинтилляционных сигналов, где происходит окончательная попарная компенсация лавинных шумовых импульсов, прошедших по обоим каналам.

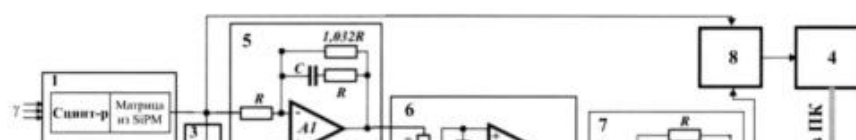
Способ подавления лавинного шума  
в спектрометрах с медленными  
сцинтилляторами и кремниевыми  
фотоумножителями



Фиг. 1

11

Способ подавления лавинного шума  
в спектрометрах с медленными  
сцинтилляторами и кремниевыми  
фотоумножителями



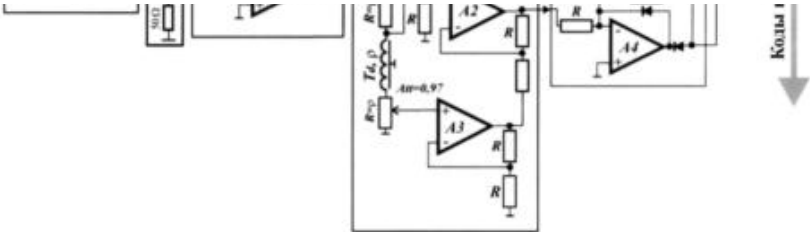


Рис. 2



Способ подавления лавинного шума  
в спектрометрах с медленными  
сцинтилляторами и кремниевыми  
фотоумножителями

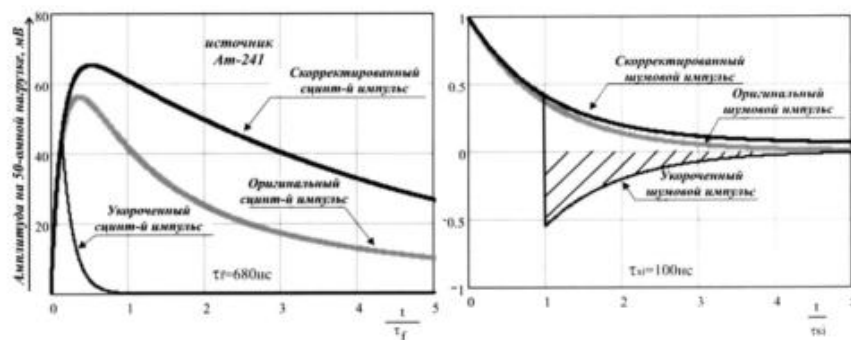


Рис. 3

## ИЗВЕЩЕНИЯ

**ММ4А Досрочное прекращение действия патента из-за неуплаты в установленный срок пошлины за поддержание патента в силе**

Дата прекращения действия патента: **16.05.2017**

Дата внесения записи в Государственный реестр: **26.02.2018**

Дата публикации и номер бюллетеня: **26.02.2018** Бюл. №06

